

# シリコン分子層エピタキシーとその応用に関する基礎的研究

著者	青木 健二
号	1121
発行年	1989
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/12070">http://hdl.handle.net/10097/12070</a>

氏 名	青 木 健 二
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成 2 年 3 月 14 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 59 年 3 月 宮崎大学大学院工学研究科応用物理学専攻 修士課程修了
学 位 論 文 題 目	シリコン分子層エピタキシーとその応用に関する 基礎的研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 西澤 潤一 東北大学教授 稲場 文男 東北大学教授 宮本 信雄 東北大学教授 水野 皓司

## 論 文 内 容 要 旨

本論文は、半導体の主流であるシリコンの単結晶薄膜を単原子層ずつ成長させるシリコン分子層エピタキシー (Si Molecular Layer Epitaxy; SiMLE) の実現とその応用可能性に関する包括的な一連の研究成果をまとめたものである。

第 1 章 (序論) では、まず一連の研究の背景となる半導体技術の進歩の現状と課題にふれ、特にシリコン結晶成長技術については主な研究の歴史的経緯にもふれつつその重要性を述べている。そして、今日における半導体エピタキシー技術の大きな課題が、単結晶をより低温においてかつ単原子層ずつ成長させる手法を確立することである、との認識に立ったうえで、この大きな課題に関連した近年の技術に注目し、主に化合物半導体の場合を例にとり、その進歩の状況について詳述している。そこでは、まず蒸着という従来の物理的手法に基づいた分子線エピタキシー (MBE) がその原理的制約のために、いまだ多くの実用上の課題を抱えている現状について述べて、つぎに MBE の発展としての T. Suntola らによる原子層エピタキシー (ALE) についてその技術的到達点を明確にしている。そして最後に、ALE をさらに発展させた表面反応制御に基づく結晶成長方法である MLE (GaAs MLE) の誕生とその特徴について述べている。

本研究は大別して 3 つの個別的な研究から構成されている。第 1 の研究 (第 2 章, 第 3 章) においては、半導体の主流である Si における MLE (SiMLE) の実証が試みられた。第 2 章においては、Si 気相成長機構に関するそれまでの知見をもとに、材料ガスの検討をまず行ない、次に SiMLE 実

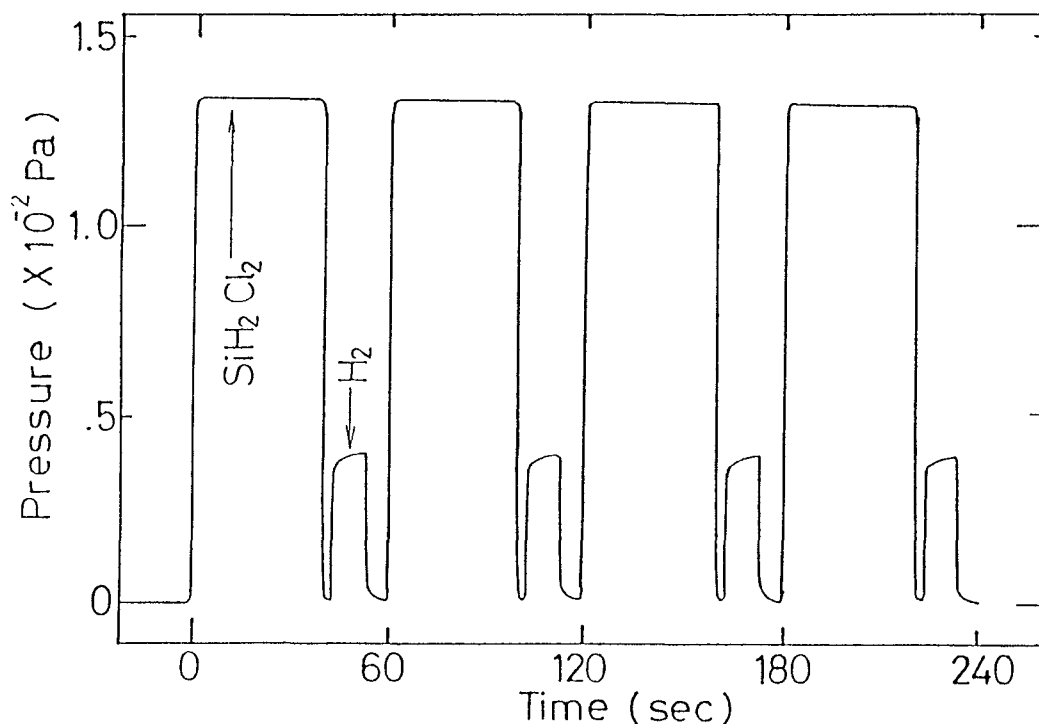
現のための予備的実験のおよび考察が、主に減圧状態における赤外分光分析法および減圧エピタキシャル成長実験により行われている。この結果、SiMLEを実現する基板温度としては900℃以下が妥当である、との結論が得られている。そして第3章においては、第2章の結論を踏まえて、900℃以下においてSiMLEの実証を行なっている。その結果、ソースガスとして $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ を、また表面吸着種との反応ガスとして $\text{H}_2$ を用い、これらのガスを交互に導入するという分子層エピタキシー独自の手法を応用することにより、基板温度850℃、1サイクル60秒のモードにおいてSiMLEを実証している。そして、SiMLEの優れた特徴として、単原子層精度での膜厚制御性、850℃以下での低温成長、 $\text{SiO}_2$ に対する選択成長が明らかにされている。またそこでは成長の面方位依存性が面方位(100)および(111)の基板を用いて調べられ、(100)面と(111)面とではMLE成長の条件を満足する基板温度が異なり、またその要因に関して表面ボンド状態の違いという視点からの考察を行なっている。

第2の研究(第4章)では、四重極質量分析計を用いてSiMLEにおける成長メカニズムに関する考察がなされた。そこでは、 $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{H}_2$ 系でのSiMLEにおけるSiの成長過程において、基板上に存在する主たる反応種が $\text{SiCl}_2$ であることが、成長モードにおける反応分析をはじめとする一連の分析により明らかにされている。そしてこのことによって、西澤、仁平、斉藤らによる赤外分光分析の結果に基づく豊富なSi結晶成長機構に関する知見に、今回新たに質量分析による成果を加えることができています。また、昇温脱離による分析において、Si表面と $\text{SiO}_2$ 表面とでは $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ の吸着量が異なることを、500℃以下という低温においてではあるが、確認している。

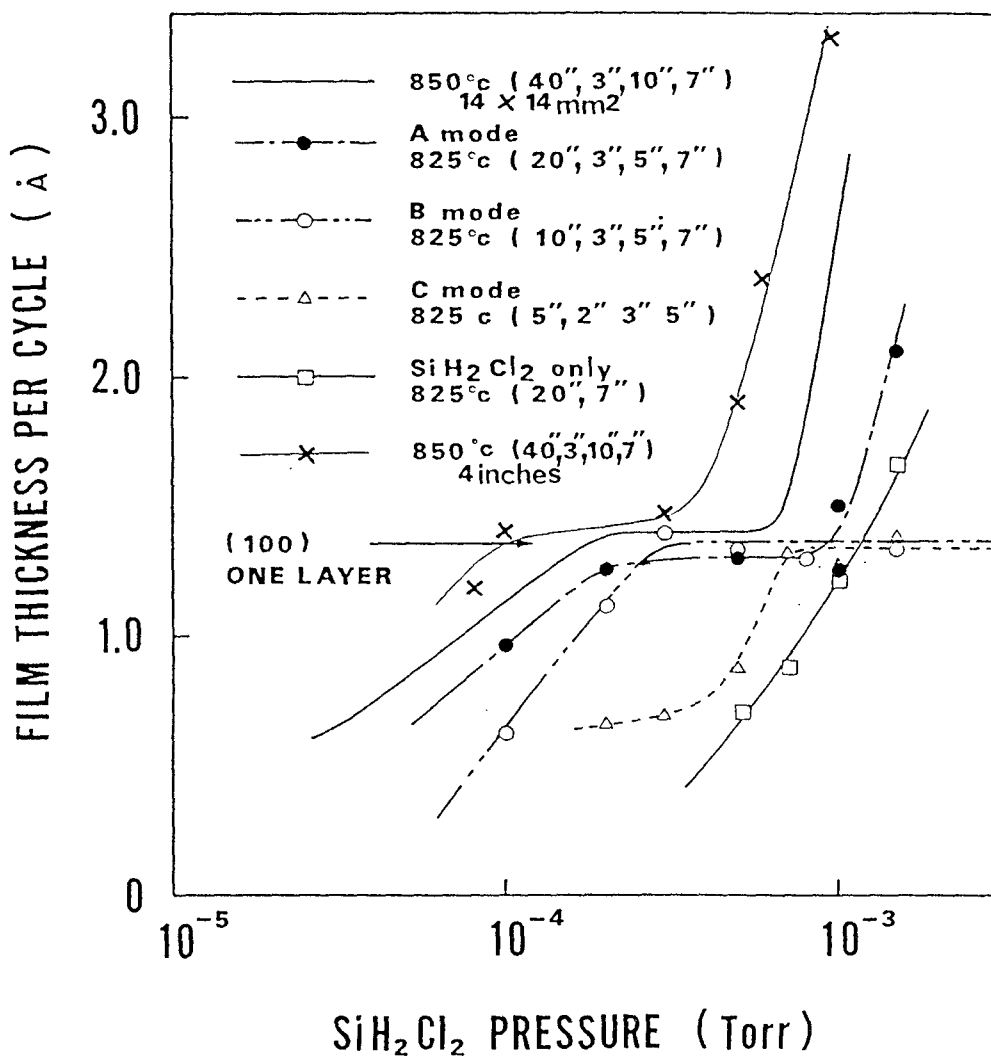
第3の研究(第5章、第6章)においては、SiMLEの応用という観点に立った一連の検討がなされている。特にMOSプロセス及びMOSデバイスへの応用を前提として、まず第5章において4インチサイズのSi基板への均一成膜、ガス導入モードの短縮化に関する検討、不純物ドーピング等が試みられた。その結果、成長膜厚の均一性という点では基板面内で平均値 $\pm 2\%$ 以下の均一成膜を達成し、大面積基板上への成長が容易に可能であることが裏付けられた。またガス導入の1サイクルに要する時間の短縮化を成長膜の表面モルフォロジー及び結晶性との関連において検討し、実用的なモードとして現段階において1サイクル35秒のモードを得ている。またこの検討の結果、結晶性及びMLE成長の条件を維持しつつサイクルタイムを短縮する場合の制約条件が明らかにされている。不純物ドーピングされたエピタキシャル成長に関しては、P型で $\text{B}_2\text{H}_6$ を用いて $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上のBドーピングが、またN型で $\text{AsH}_3$ を用いて $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のAsドーピングが、それぞれ達成された。そして、PNダイオードを試作してこれらの不純物ドーピング層の電気的評価を行ない、実用的なレベルのI-V特性が得られている。また、不純物ドーピングにおける1サイクルあたりの成長膜厚は、ドーパント濃度の増加に対して、P型の場合には増加し、N型の場合には逆に減少することがわかった。さらにこの応用に関する研究の過程においては、化学的に活性な基板表面上に安定な不純物吸着層を形成し、この不純物吸着層を拡散源として不純物拡散を行なう新しいドーピングの方法、Molecular Layer Doping (MLD)が提案され、Bのドーピングにおいて実証された。このMLDの実証過程において、従来の半導体製造プロセスにおける代表的なドーピング技術であるイオン注入法では実現が困難な $0.1 \mu\text{m}$ 以下の浅い接合を有するボロンの高濃度ドーピング層を

容易に形成している。次に第6章においては、SiMLEのMOSデバイスへの応用が試みられている。そこでは、NチャンネルMOSトランジスタのチャンネル領域がノンドープSiMLEで形成され、高濃度基板上に膜厚が1000Å以下のエピタキシャル成長層を設けてチャンネル領域とすることにより、シミュレーションで予測されたデバイスの耐短チャンネルの特性の向上と高速化を確認している。またPチャンネルMOSトランジスタのソース・ドレインがMLDで形成されている。そしてそれらの試作デバイスが従来プロセスで試作されたデバイスと比較検討されている。その結果、MLDがPチャンネルMOSトランジスタを微細化するうえで極めて有効であり、イオン注入法に代わるドーピング技術となる可能性があることを示している。

以上、本研究において、SiMLEが実証され、同時に、成長のメカニズムについても解明がなされた。また、SiMLEの技術的ポテンシャルの高さが証明されたと言えよう。SiMLEはその原理的特徴から単原子層精度のエピタキシーが本質的に必要となるようなデバイスの製造においては、量産性に何ら技術的制約がないALE技術であると結論するに至った。



第3-4図 ガス導入・排気のシーケンスチャート



第5-2図 1サイクルあたりの成長膜厚とガス導入モード

## 審 査 結 果 の 要 旨

シリコンは依然として半導体工業の主力材料である。その技術蓄積も圧倒的に多い。しかし、キャリアの平均自由行程はガリウム砒素などに比較して短く、格子振動による散乱の無視できる高性能デバイスを作ろうとすると、厚味の制限がその割合で厳しくなるため、高度精密加工技術が必要となる。その対策として、半導体基盤結晶に或る種の気体分子を吸着させて後、別の気体分子を注入して、表面に吸着していたものと反応させることによって、一分子層だけの結晶膜を成長させる方法がフィンランドのストラ博士によって原子層成長法の第2番目の方法として提案されたが、実際の実験は多結晶膜を作るのに使われただけであった。

本論文はこの方法をシリコン単結晶膜の作成に応用して、見事な成果を挙げた研究の内容を取りまとめたもので、序論と結論を含み7章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の企画された経緯とその意義について述べたものである。第2章より本論に入り、先ず分光分析測定を中心とした反応過程の成分分析結果より  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  が最適材料と考えられた理由を紹介して、若干の気相成長実験を行っている。第3章は  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  と水素とを交互導入することにより  $850^\circ\text{C}$  前後で単分子膜成長に成功した実験を詳述したもので、重要な結果を多く含んでいる。

第4章では、上述の結果を基礎的に解明するために脱出ガス分子の質量分析を行った結果をまとめ、 $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  は吸着時に水素を放出して  $\text{SiCl}_2$  となり、次の  $\text{H}_2$  注入によって  $\text{Si}$  となるとしている。吸着粒子が  $\text{SiCl}_2$  であることを示したのは重要な新しい成果である。

第5章では、本技術の開発結果を工業応用するための基礎調査研究を行った結果について述べている。成長膜厚の均一性は4インチ結晶板で $\pm 2\%$ で、不純物をドーブした分子層を成長させると硼素をドーブしたとき固溶限以上の含有量が実現できることを見出している。

第6章は以上の結果を応用してMOSデバイスを試作した結果について述べたもので、本エピタキシー法がイオン注入法の代りに拡散不純物源としてより有効であることを示したのは重要な結論である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、分子層成長技術をシリコンで初めて実施すると共に、基本プロセスを解明し、更に工業応用の基礎を固めたもので、結晶成長の機構の解明と、半導体プロセス技術の進歩に資するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。